

BESCHREIBUNGVorrichtung und Verfahren zum Führen zumindest zweier  
Strömungsmittel

5

Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung und ein Verfahren  
zum Führen zumindest zweier Strömungsmittel unterschied-  
lichen Druckes nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1.

10

Die Durchführung von Bewegungen und Kräften durch druckhal-  
tende Begrenzungswände zwischen zwei Fluidsystemen wie Ga-  
sen und Flüssigkeiten unterschiedlichen Drucks wird in her-  
kömmlicher Art im wesentlichen durch wellen- und Stangen-  
dichtungen wie Stopfbuchsen, Dichtringe und Gleitringdich-  
tungen verwirklicht. Auf der Niederdruckseite findet man  
meist Umgebungsluft unter Umgebungsdruck. Bei Vakuumsyste-  
men ist die Umgebungsluft auf der Hochdruckseite. Die ge-  
nannten Dichtungsarten benötigen für ihre einwandfreie  
Funktion einen gewissen Leckagefluss von der Seite höheren  
zur Seite niederen Druckes, da es sich um berührende Dich-  
tungen handelt, die eines Schmiermediums bedürfen, um im  
Betrieb nicht zerstört zu werden.

25

Bei vielen Anwendungen ist solch eine Leckage aber nicht  
erwünscht oder sogar nicht zulässig, weil das Fluid z.B.  
toxisch, geruchsbelästigend oder explosiv ist, oder weil  
ein Hochvakuum aufrecht erhalten werden soll. Doppelsysteme  
mit Sperrmedien -- beispielsweise doppeltwirkende Gleit-  
ringdichtungen -- mögen die Leckage reduzieren bzw. die  
Leckage des Druckfluids durch die Leckage eines weniger  
schädlichen Sperrfluids substituieren.

30

Technisch leckagefreie Durchführungen werden heute im we-  
sentlichen nach drei Prinzipien realisiert: Spaltrohrmotor,  
Magnetkupplung und magnetofluidische Dichtung.

35

Beim Spaltrohrmotor ist der Motor Teil der Maschine, des Apparates oder des Gerätes, z.B. oft verwendet in einer Pumpe. Der Stator ist auf der Niederdruckseite der Pumpe positioniert und durch ein nichtmagnetisierbares Spaltrohr von der Hochdruckseite isoliert. Der Rotor befindet sich innerhalb der Hochdruckseite der Pumpe. Das Drehmoment wird über elektromagnetische Kräfte durch das Spaltrohr berührungsfrei vom Stator auf den Rotor übertragen.

Die ebenfalls im Pumpenbau gebräuchliche Magnetkupplung funktioniert nach einem ähnlichen Prinzip, jedoch befindet sich auf der Niederdruckseite der Pumpe statt einer Statorwicklung ein Außenrotor mit einer Anordnung von Permanentmagneten, der eine entsprechende Anordnung von Permanentmagneten bzw. ein Induktionskäfig oder -ring auf der Rotorseite gegenübersteht. Der Außenrotor ist mit einem herkömmlichen Motor verbunden, der das Drehmoment erzeugt, das über magnetische Feldlinien -- wieder berührungsfrei -- auf den Rotor übertragen wird. Die beiden Kupplungselemente sind meist durch ein topfförmig gestaltetes Gehäuseelement, einen Spalttopf, gegeneinander druckisoliert.

Bei der Durchführung auf Basis von Magnetofluid bildet eine magnetisierbare Flüssigkeit -- meist eine Dispersion feinsten ferromagnetischer Partikel mit Hilfe eines Hilfsstoffes in einem Trägeröl -- ein äußerst flexibles und anpassungsfähiges undurchlässiges Dichtelement, z.B. in Form eines "flüssigen O-Ringes" zwischen Welle und Gehäuse, das durch ein entsprechend gestaltetes Magnetfeld am Ort des abzudichtenden Spaltes fixiert wird. Diese Dichtungsart wird kommerziell etwa in Festplattenlaufwerken und Vakuumdurchführungen in der Oberflächentechnik verwendet.

Die genannten leckagefreien Durchführungsarten haben insbesondere für den Pumpenbau mehrere Nachteile; sowohl Spaltrohrmotor als auch Magnetkupplung benötigen zur Lagerung

des Rotors Lagerelemente, die vom Fördermedium der Pumpe selbst geschmiert werden müssen und somit sehr störungsanfällig sind. Der Vorteil der Magnetkupplung, nämlich die Verwendbarkeit von Normmotoren, ist beim Spaltrohrmotor nicht gegeben. Demgegenüber weist die Magnetkupplung den Nachteil auf, dass bei unterschiedlicher zu übertragender Leistung nicht nur unterschiedliche Motoren, sondern auch unterschiedlich dimensionierte Kupplungen eingesetzt werden müssen, um bei kleinen Leistungen keinen Preisnachteil in Kauf nehmen zu müssen. Beide Prinzipien sind durch die Art der Drehmomentübertragung und der Lagerung in ihrer Möglichkeit zur Leistungsübertragung aufgrund des überproportional steigenden Aufwandes bei hohen Leistungen begrenzt. Insbesondere sind hohe Wirbelstromverluste nachteilig, die in Spaltrohren und Spalttöpfen in herkömmlicher Bauart in nichtmagnetischen Metallegierungen induziert werden.

Magnetofluidische Dichtungen sind in ihrer Anwendbarkeit auf geringe Differenzdrücke begrenzt. Beispielsweise sind für die Abdichtung von 1 bar gegenüber Vakuum sechs hintereinander geschaltete Dichtelemente notwendig. Der übliche Druckbereich für einstufige Kreiselpumpen geht jedoch bereits bis 25 bar und für Sonderanwendungen sowie andere Pumpensysteme weit darüber hinaus. Außerdem müssen die chemische Verträglichkeit sowie Mischvorgänge zwischen den beteiligten Fluiden und dem Magnetofluid beachtet werden.

In Kenntnis dieser Gegebenheiten hat sich der Erfinder das Ziel gesetzt, bei einer eingangs genannten Vorrichtung eine leckagefreie Durchführung zu erstellen, welche die oben erwähnten Nachteile beseitigt sowie für die Übertragung auch sehr hoher Leistungen zwischen Bereichen mit hohen Druckdifferenzen -- bevorzugt mindestens 25 bar -- ohne notwendige Lagerschmierung durch ein beteiligtes Fluid ermöglicht. Darüber hinaus soll die Erfindung auch noch kostengünstiger und leichter in der Handhabung sein als Einrichtungen nach dem Stande der Technik.

Zur Lösung dieser Aufgabe führen die Lehren der unabhängigen Ansprüche; die Unteransprüche geben günstige Weiterbildungen an. Zudem fallen in den Rahmen der Erfindung alle  
5 Kombinationen aus zumindest zwei der in der Beschreibung, der Zeichnung und/oder den Ansprüchen offenbarten Merkmale. Bei angegebenen Bemessungsbereichen sollen auch innerhalb der genannten Grenzen liegende Werte als Grenzwerte offenbart und beliebig einsetzbar sein.

10 Erfindungsgemäß sind zwischen einem kraftübertragenden Organ, beispielsweise einer Welle, und einem druckisolierenden Element wie einem Gehäuse od.dgl. Dichtungsmittel oder -elemente so angeordnet, dass drei -- insbesondere in Achs-  
15 richtung nebeneinander liegende -- Räume entstehen: ein Bereich mit einem ersten Fluid bestimmten Druckes -- beispielsweise einem Fördermedium mit 25 bar --, ein Bereich für ein zweites Fluid mit einem Differenzdruck zum ersten Fluid -- etwa Umgebungsluft mit 1 bar absolut -- sowie ein  
20 zwischen diesen Bereichen angeordneter dritter Raum für ein Hilfsmittel bzw. eine Hilfsflüssigkeit. Letzterer wird durch eine Einrichtung in zwei Teilräume für zwei unterschiedliche Druckbereiche unterteilt.

25 Die Hilfsflüssigkeit kann beispielsweise ein Silikonöl sein, das auch als Trägeröl ein Magnetofluid eingesetzt wird; denn es hat sich als günstig erwiesen, magnetofluidische Dichtungsmittel einzusetzen, dies insbesondere zum Begrenzen des Raumes für die Hilfsflüssigkeit. Diese  
30 magnetofluidische Dichtung sperrt den Raum hermetisch ab.

Im Bereich mit der Hilfsflüssigkeit bzw. dem Hilfsfluid befinden sich Mittel, die innerhalb dieses Bereiches einen Differenzdruck erzeugen, wobei der höhere Druck auf der  
35 Seite zum Fluid mit dem höheren Druck hin und umgekehrt erzeugt wird. Die erzeugbare Druckdifferenz muss mindestens

dem maximal auftretenden Differenzdruck zwischen dem ersten sowie dem zweiten Fluid entsprechen.

5 Vorteilhafterweise soll dem Raum höheren Drucks ein Fördermedium sowie dem Raum niederen Drucks Umgebungsluft zugeordnet sein. Die Hilfsflüssigkeit soll ein Trägeröl des dem Dichtungselement zugeordneten Magnetofluids sein, gegebenenfalls ein Silikonöl.

10 Erfindungsgemäß weist der Raum für die Hilfsflüssigkeit zwei Anschlüsse auf, von denen einer zum Erzeugen eines Vakuums sowie der andere als Durchgang für die Hilfsflüssigkeit ausgebildet ist. Zudem soll der Teilraum für den höheren Druck der Hilfsflüssigkeit dem Raum für das Fluid höheren Druckes zugeordnet sein.

15 Auch zeichnet sich der Erfindungsgegenstand durch relativ zueinander bewegbare, dem druckisolierenden Element und dem kraftübertragenden Organ zugeordnete geometrische Teile aus, die zum Erzeugen einer Druckdifferenz eine Fördereinrichtung für die Hilfsflüssigkeit bilden. Die den Raum für die Hilfsflüssigkeit teilende Einrichtung ist bevorzugt eine Fördereinrichtung.

25 Die Druckdifferenz innerhalb der Hilfsflüssigkeit wird günstigerweise durch Relativbewegungen geometrischer Teile erzeugt, die dem kraftübertragenden Organ und dem druckisolierenden Element -- dem Gehäuse -- statisch zugeordnet sind und eine Fördereinrichtung, etwa eine Pumpe, für die 30 Hilfsflüssigkeit bilden. Dabei wird durch geeignete Maßnahmen -- z.B. die Anordnung eines Rückschlagventils -- sichergestellt, dass bei Stillstand des Systems kein Druckausgleich zwischen Hoch- und Niederdruckbereich der Hilfsflüssigkeit stattfindet.

35

Nach einem anderen Merkmal der Erfindung entspricht die erzeugbare Druckdifferenz zumindest dem maximal auftretenden Differenzdruck zwischen den Fluiden.

- 5 Erfindungsgemäß sind weiterhin Mittel vorgesehen, die auf den Differenzdruck zwischen dem Fluid mit hohem Druck und dem Maximaldruck der Hilfsflüssigkeit reagieren. Die Reaktion wird erfindungsgemäß dazu genutzt, um durch geeignete Mittel die genannte Druckdifferenz auf einen Wert nahe Null  
10 zu regeln. Dies kann z.B. durch Regelung der Leistung der die Druckdifferenz erzeugenden Mittel geschehen oder durch Regelung einer Rückströmung aus dem Bereich hohen Druckes der Hilfsflüssigkeit zum Bereich niedrigen Druckes. Es sind Organe zum Regeln der Leistung der die Druckdifferenz erzeugenden Mittel vorhanden oder Organe zum Regeln einer  
15 Rückströmung aus dem Teilraum höheren Drucks der Hilfsflüssigkeit zum Teilraum niederen Drucks.

- Vorteilhafterweise ist zwischen den Teilräumen für die  
20 Hilfsflüssigkeit eine Leitung mit ventilartiger Überströmeinrichtung vorgesehen.

- Ist erfindungsgemäß das Volumen zumindest des Raumes für die Hilfsflüssigkeit veränderbar ausgebildet, so kann insbesondere der Teilraum für den niedrigen Druckbereich der  
25 Hilfsflüssigkeit in seinem Volumen veränderbar gestaltet sein. Durch die Veränderlichkeit des Volumens des Raumes für die Hilfsflüssigkeit werden Änderungen der Dichte und damit des Volumens des Hilfsfluids -- hervorgerufen durch  
30 Temperatur- oder auch Druckveränderungen -- kompensiert.

- Indem das Volumen des der Hilfsflüssigkeit zugeordneten Raumes variabel gestaltet wird, kann erfindungsgemäß sichergestellt werden, dass auch die Druckdifferenz  
35 zwischen dem Minimaldruck der Hilfsflüssigkeit und dem Druck des Fluids mit dem niedrigeren Druck nahezu Null ist. Dies mag z.B. durch eine flexible Membrane zwischen einer

Seite des Raumes für die Hilfsflüssigkeit und dem Fluid mit entsprechendem Druck realisiert werden, oder -- besonders vorteilhaft -- durch bewegliche Anordnung zumindest einer magnetofluidischen Dichtung. Bei Anordnung mit Umgebungs-  
5 luft unter Normaldruck (1 bar) auf der Niederdruckseite ist es am vorteilhaftesten, den Raum auf dieser Seite im Volumen variabel zu gestalten.

Die dargestellten Mittel führen dazu, dass die magnetofluidischen Dichtungen auch bei hohen Druckdifferenzen des ersten und des zweiten Fluids nur mit geringen Differenzdrücken belastet werden und somit ihre hermetische Dichtungsfunktion sichergestellt ist. Die Kraftübertragung erfolgt mechanisch über das kraftübertragende Element -- beispielsweise eine Welle --, so dass hohe Übertragungsleistungen möglich sind.

Die magnetofluidische Dichtung zur Hochdruckseite besteht bevorzugt aus drei Dichtelementen -- dargestellt durch drei  
20 in Achsrichtung magnetisierte Permanentmagnete mit zugeordneten ferromagnetischen Polschuhen, die jeweils ein konzentriertes magnetisches Feld erzeugen, das ein Ferrofluid als Dichtmittel fixiert. Diese sind in einem nichtmagnetischen Trägerring vorgesehen. Der Trägerring ist erfindungsgemäß  
25 über einen -- bevorzugt metallischen -- Faltenbalg am Gehäuse fixiert. Letzterer soll dem Träger- oder Verschlussring anliegen sowie anderseits dem Druck tragenden Element. Eine gute Montierbarkeit der Vorrichtung wird durch Befestigung des Faltenbalges an einer Buchse realisiert, die  
30 mit einem O-Ring gegen die Gehäusebuchse abgedichtet ist und durch einen Gewindering an der Gehäusebuchse fixiert wird.

Der Verschluss- oder Trägerring beinhaltet im Rahmen der  
35 Erfindung weiterhin eine -- vorteilhafterweise aus Siliziumkarbid geformte -- Dichtscheibe, die Teil eines mechanischen Dichtungssystems ist, das aus zwei gleichartigen

SiC-Scheiben besteht. Eine der Scheiben weist in der Kontaktfläche entsprechend einem von außen nach innen wirkenden axialen Spiralrillenlager spiralförmig von außen zum Zentrum der Scheibe verlaufende Vertiefungen von einigen  $\mu\text{m}$  Tiefe auf; diese Vertiefungen gehen vorteilhafterweise vom Scheibenrand aus und enden in Abstand zu einem Zentraldurchbruch der ringartigen Dichtscheibe. Eine Aufgabe jenes Faltenbalges besteht darin, die der Gehäusebuchse zugeordnete Dichtscheibe bewegbar zu lagern und so deren Förderwirkung durch den Differenzdruck zu limitieren.

Erzeugen die Dichtscheiben im Betrieb einen höheren Druck als den abzudichtenden innerhalb der Pumpe, wird der Trägerring mit der zugeordneten Dichtscheibe in Richtung des abzudichtenden Druckes bewegt; der Abstand zwischen den Dichtscheiben wird größer und konsequenterweise lässt die Förderwirkung nach. Umgekehrt führt ein zu geringer durch die Dichtscheiben erzeugter Druck zur Verringerung des Spaltes zwischen den Dichtscheiben und damit zu einer Erhöhung der Förderwirkung.

Es liegt im Rahmen der Erfindung, dass die Mittel zur Erzielung der Dichtungswirkung dabei einer Wellenhülse und einer Gehäusebuchse zugeordnet werden. Wellenhülse und Gehäusebuchse sowie alle mit dem Förderfluid der Pumpe in Kontakt stehenden Teile bestehen aus nicht magnetischen Materialien, die ausreichend fest und gegen das Förderfluid chemisch beständig sind. Die Wellenhülse ist gegen die Welle und die Gehäusebuchse gegen das Gehäuse durch O-Ringe statisch abgedichtet. Die Gehäusebuchse kann mit Hilfe von Schrauben am Gehäuse befestigt werden. Die hermetische Dichtung ist dabei so ausgeführt, dass sie als Einheit montiert und demontiert werden kann.

Nach einem anderen Merkmal der Erfindung werden Wellenhülse und Gehäusebuchse zueinander durch Wälzlager -- etwa durch ein Doppelschräggugellager -- konzentrisch drehbar in defi-



niertem axialem Abstand gehalten. Bei Bedarf ist das Lager auch zur Aufnahme von auf die Welle wirkenden axialen Kräften geeignet. Dazu muss die Wellenhülse z.B. mit einem Sicherungsring oder einer Wellenmutter auf der Welle  
5 fixiert werden.

Als günstig hat es sich erwiesen, das Wälzlager in einem von Wellenhülse und Gehäusebuchse begrenzten Ringraum festzulegen. Dieses Wälzlager soll durch Sicherungsringe der  
10 Gehäusebuchse bzw. der Wellenbuchse und/oder durch einen flanschartigen radialen Außenring in jenem Ringraum fixiert werden.

Nach einem weiteren Merkmal der Erfindung liegt das Wälzlager einem Außenring der Wellenhülse an, dem andererseits eine der Dichtscheiben aus Siliziumkarbid zugeordnet ist. Vor-  
15 teilhafterweise lagert eine der Dichtscheiben in einem sich von dem Außenring weg axial stufenweise erweiternden Abschnitt des Ringraums, dem der Verschlussring mit der anderen Dichtscheibe vorgeordnet ist.  
20

Erfindungsgemäß verläuft zwischen der Außenfläche der Dichtscheibe und dem benachbarten Verschlussring ein Radialspalt, an den gegebenenfalls einerseits ein axialer  
25 Ringspalt zwischen der Welle und den Dichtelementen anschließt sowie andererseits ein weiterer axialer Ringspalt, der die benachbarte Dichtscheibe untergreift.

Der besseren Fixierung halber soll die Dichtscheibe zudem  
30 durch wenigstens einen achsparallelen Mitnehmerstift an die Mittelwand des Verschlussrings angeschlossen sein.

Von erfinderischer Bedeutung ist auch, dass an der Seite der Vorrichtung, die mit einer Flüssigkeit als Fluid beaufschlagt ist -- beispielsweise dem magnetofluidischen Dichtungs-  
35 element am Träger- oder Verschlussring -- eine teilweise mit einem Gas, etwa Luft oder Inertgas, gefüllte Kam-

mer vorgelagert sein kann, die zudem an der der Vorrichtung  
abgewandten Seite zur Welle mit einem Dichtspalt von etwa  
0,1 mm abgedichtet ist; dessen Durchmesser wird größer ge-  
wählt als der Durchmesser des Dichtspaltes des magneto-  
fluidischen Dichtungselements am Trägerring aber kleiner  
5 als der Durchmesser der äußeren Kammerwand.

Das Volumen der Kammer und die Breiten der Dichtspalte sind  
erfindungsgemäß so gestaltet, dass bei horizontaler Anord-  
nung und Stillstand des Systems sowie bei Umgebungsdruck  
10 innerhalb der Kammer immer ein bestimmtes Gasvolumen im  
oberen Bereich der Kammer oberhalb des Dichtspaltes der  
Kammer residual vorhanden ist. Im Betrieb sammelt sich die-  
ses Gasvolumen im Bereich des kleinsten Durchmessers der  
15 Welle -- in diesem Fall des Dichtspalts der magnetofluidi-  
schen Dichtung -- konzentrisch um die Welle und wird durch  
den Betriebsdruck auf ein kleineres Volumen zusammenge-  
drückt. Auch wenn die beiden Volumina von gleicher Größe  
sind, soll durch geeignete Wahl der Breite des Dichtspaltes  
20 der Kammer dabei kein Gas aus dem letzteren entweichen.  
Andererseits soll das zweite Volumen groß genug sein, um  
den Dichtspalt der magnetofluiden Dichtung im Betrieb auch  
bei maximalem Druck vollkommen abzudecken. Ein günstiges  
Breiten- oder Durchmesser Verhältnis zwischen dem Dichtspalt  
25 der magnetofluidischen Dichtung, dem Dichtspalt der Kammer  
und deren inneren Außendurchmesser liegt nach einem weite-  
ren Merkmal der Erfindung bei 1 zu 1,2 zu 1,5.

Die Anordnung stellt sicher, dass die magnetofluidische  
30 Dichtung im Betrieb stets nur mit Gas in Kontakt kommt.  
Eine Durchmischung des Magnetofluids mit einer abzudichten-  
den Flüssigkeit wird somit wirksam verhindert.

Bei abzudichtenden Flüssigkeiten, bei denen keine chemische  
35 Reaktion mit Luft zu erwarten oder eine Reaktion unschäd-  
lich ist, kann das Residualvolumen an Luft innerhalb der  
Kammer bei Befüllung der Pumpe genutzt werden. Anderenfalls

ist ein Hilfsanschluss an die Kammer erforderlich, um sie vor Inbetriebnahme der Pumpe mit einem Inertgas zu füllen.

Die Erfindung umfasst also mehrere einander zugeordnete Funktionskomplexe, nämlich zum einen die Räume mit den hermetischen Dichtungen und dem Hilfsfluid, zudem Mittel zum Erzeugen der Druckdifferenz, dann die Regelung der Druckdifferenz mit Hochdruck. Auch der Druckausgleich im Hilfsfluid -- die Druckdifferenz zum Niederdruck -- wird erfasst sowie die beschriebene Zusatzeinrichtung für die Gasbeaufschlagung.

Im Rahmen der Erfindung liegt auch ein Verfahren, bei dem -- insbesondere unter Verwendung der oben beschriebenen Vorrichtung -- zwischen dem kraftübertragenden Organ und dem druckisolierenden Element in -- durch jeweils ein Dichtungselement begrenzten Räumen -- Fluide unterschiedlichen Druckes und zwischen diesen in einem Raum eine Hilfsflüssigkeit bzw. ein Hilfsfluid gehalten werden; in letzterer werden zwei Druckbereiche hergestellt, zudem soll der Teilbereich für den höheren Druck jener Hilfsflüssigkeit dem Raum für das Fluid höheren Druckes zugeordnet werden. Der Raum für die Hilfsflüssigkeit soll beidseits zu den Räumen für die Fluide durch magnetofluidische Dichtungselemente thermisch abgedichtet werden.

Ein weiterer Verfahrensschritt sieht vor, dass der Raum für die Hilfsflüssigkeit vor deren Einführung mit einem Vakuum beaufschlagt wird; die Hilfsflüssigkeit vermag so sämtliche Hohlräume innerhalb der Vorrichtung aufzufüllen.

Zudem soll eine Rückströmung aus dem Teilraum höheren Drucks der Hilfsflüssigkeit zum Teilraum niederen Drucks geregelt werden.

Das erfindungsgemäße Verfahren umfasst auch, dass die Druckdifferenz innerhalb der Hilfsflüssigkeit durch Relativbewegung geometrischer Elemente erzeugt wird, die der Welle einerseits und dem druckisolierenden Element andererseits zugeordnet sind und eine Fördereinrichtung bilden.

Nach einem anderen Verfahrensmerkmal wird durch Dichtscheiben, die zwischen sich spiralartige Rillen bzw. Vertiefungen begrenzen, eine Förderwirkung für die Hilfsflüssigkeit aufgebaut. Die Förderwirkung der Dichtscheiben soll durch Vermehrung von deren Druck sowie des Abschnitts zueinander erhöht werden.

Ein anderes Merkmal des erfindungsgemäßen Verfahrens bietet an, dass in einer dem Dichtungselement vorgelagerten sowie ein Gas enthaltender Kammer das Gasvolumen im Betrieb im Bereich des Dichtspaltes zwischen Dichtungselement und Welle konzentrisch um diese gesammelt sowie durch den Betriebsdruck zusammengedrückt wird.

Als Vorzüge des erfindungsgemäßen Systems sind vor allem folgende Einzelheiten anzusehen:

- mit geringen Kosten realisierbar;
- keine Wirbelstromverluste;
- als Cartridge montierbar;
- einfacher Austausch möglich;
- geringer Platzbedarf;
- keine Gleitlager innerhalb der Pumpe erforderlich;
- Aufnahme des Axialschubes durch das integrierte Wälzlager möglich;
- Einsatz von kostengünstigen Ferritmagneten möglich;

5

- auch für Pumpen mit sehr hoher Leistung einsetzbar;
- mit geringem konstruktiven Aufwand in vorhandene Pumpen-Baureihen zu integrieren.

Weitere Vorteile, Merkmale und Einzelheiten der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung bevorzugter Ausführungsbeispiele sowie anhand der Zeichnung; diese zeigt in:

5

Fig. 1: einen Dichtungsbereich einer Pumpenwelle im Längsschnitt mit erfindungsgemäßer Dichtung vor dem Zusammenbau;

10

Fig. 2: den Dichtungsbereich gemäß Fig. 1 in montiertem Zustand;

Fig. 3: den gegenüber Fig. 2 etwas vergrößerten Dichtungsbereich ohne Pumpenwelle;

15

Fig. 4: einen vergrößerten Ausschnitt aus Fig. 2, 3;

20

Fig. 5: einen vergrößerten Ausschnitt aus Fig. 4 in anderer Ausgestaltung;

Fig. 6: eine Gehäusebuchse des Dichtungsbereichs im Längsschnitt;

25

Fig. 7: eine Wellenhülse des Dichtungsbereichs im Längsschnitt;

Fig. 8 bis

30

Fig. 10: diametrale Schnitte durch unterschiedliche, die Wellenbuchse umfangende Organe des Dichtungsbereichs;

Fig. 11: ein vergrößertes Detail der Fig. 10;

35

Fig. 12: Draufsicht auf eine für den Dichtungsbe-  
reich bestimmte ringartige Dichtscheibe;

- Fig. 13, 14: zwei Diametralschnitte durch ein Paar von Dichtscheiben nach Linie D in Fig. 12;
- 5 Fig. 15: einen schematischen Querschnitt durch einen Abschnitt der Vorrichtung;
- Fig. 16: eine Schemaskizze zu einer magnetofluidischen Dichtung;
- 10 Fig. 17: eine schematische Zuordnung von Querschnitten mit einer Zusatzeinrichtung zu unterschiedlichen Verfahrensständen;
- Fig. 18 bis
- 15 Fig. 20: drei unterschiedliche Dichtungssituationen an der in Seitenansicht wiedergegebenen Pumpenwelle.

20 Ein Dichtungsbereich Q der Pumpenwelle 10 einer nicht weiter wiedergegebenen Kreiselpumpe weist eine mit ihrer Längsachse  $M_1$  zur Längsachse M der Pumpenwelle 10 koaxiale Wellenhülse 12 der Länge a von 60 mm sowie eines Innendurchmessers d von hier 30 mm auf; die Wanddicke b der Wellenhülse 12 misst 5 mm. In einem mittleren Abstand  $a_1$

25 von etwa 25 mm zur Stirnkannte 14 der Wellenhülse 12 ragt gemäß Fig. 7 von dieser ein angeformter Außenring 16 -- identischer Wanddicke b -- der Kraglänge e von etwa 7 mm ab. Nahe des Außenringes 16 ist eine Außennut 18 für einen O-Ring 20 zu erkennen; ein weiterer O-Ring 20 lagert in

30 einer der Stirnkannte 14 nahen Innennut 19. Nahe der dargestellten Heckkannte 15 der Wellenhülse 12 findet sich eine zweite Außennut 22 als Einstich für einen weiter unten beschriebenen Sicherungsring.

- 35 Die Wellenhülse 12 wird von einer koaxialen Gehäusebuchse 26 jener Länge a umfassen, deren Innendurchmesser  $d_1$  hier 68 mm beträgt bei einer Wanddicke  $b_1$  von ebenfalls 5 mm.

Die Wellenhülse 12 ist gegen die Pumpenwelle 10 und die Gehäusebuchse 26 gegen das Pumpengehäuse durch die O-Ringe 20 statisch abgedichtet. Im übrigen kann die Gehäusebuchse 26 durch Schrauben am Gehäuse befestigt werden.

5

In mittlerem Abstand  $a_2$  von hier etwa 20 mm zur Stirnkante 28 der Gehäusebuchse 26 ragt von deren Wandung 30 ein angeformter Flanschring 32 des Durchmessers  $f$  von 100 mm sowie der Breite  $g$  von 10 mm ab, der zum einen -- beispielsweise  
10 zwei -- radiale Gewindebohrungen 34 für Verschlusschrauben 35 enthält sowie etwa vier achsparallele Durchbrüche 36 für Anschlusschrauben 38.

In axialem Abstand  $i$  (etwa 10 mm) von jener Stirnkante 28  
15 ist die Wandung 30 der Gehäusebuchse 36 ein- bzw. achswärts zweifach gestuft. Diese beiden Stufen 40, 40<sub>a</sub> jeweils geringer Radialhöhe sind erforderlich, da der Innendurchmesser  $d_2$  der Stirnkante 28 mit 73 mm größer ist als der anderseitige Durchmesser  $d_1$  von 68 mm; die Stirnkante 28 wird  
20 von einem Wandabschnitt 30a angeboten, der an jenem Flanschring 32 ansetzt. Im Bereich dieses Flanschringes 32 ist im übrigen ein innerer Formring 42 -- geringer radialer Höhe -- der Breite  $i_2$  von 10 mm aus der Wandung 30 herausgeformt (s. Fig. 6).

25

Nahe der Heckkante 44 der Gehäusebuchse 26 verläuft eine Innennut 23, die der oben erwähnten Außennut 22 der Wellenhülse 12 gegenüberliegt und mit ihr gemeinsam ein Paar von Sicherungsringen 46, 46<sub>1</sub> hält, das in dem von Wellenhülse  
30 12 und Gehäusebuchse 26 gebildeten Zylinderringraum 50 verläuft; letzterer geht am Formring 42 gemäß Fig. 1 in einen gestuften Abschnitt 51 des Zwischenraumes von Wellenhülse 12 und Gehäusebuchse 26 über.

35



Zwischen den Sicherungsringen 46, 46<sub>1</sub> und dem Außenring 16 der Wellenhülse 12 sitzt im Zylinderringraum 50 ein Wälzlager 52, beispielsweise ein Doppelschräggugellager, das Wellenhülse 12 und Gehäusebuchse 26 konzentrisch drehbar in  
5 definiertem radialen und axialen Abstand hält. Dazu muss die Wellenhülse 12 -- beispielsweise mit dem inneren Sicherungsring 46<sub>1</sub> oder einer Wellenmutter -- auf der Welle  
10 fixiert werden.

10 Vor allem die Fig. 1, 4, 5 verdeutlichen, dass die oben erwähnten Stufen 40, 40<sub>a</sub> als Anschlag für einen -- querschnittlich L-förmigen -- Haltering 56 und einen von diesem gehaltenen O-Ring 20 dienen; diese werden gemäß Fig. 1 axial in den gestuften Abschnitt 51 eingeschoben. Der --  
15 von einem von der Stirnkante 28 umgebenen Frontring 54 -- an die Stufe 40<sub>a</sub> gepresste Haltering 56 eines Innendurchmessers  $n$  von 64 mm, eines Außendurchmessers  $n_1$  von 74 mm sowie der Breite  $k$  von 7 mm steht der anderen Stufe 40 mit einem angeformten Außenring 57 der Höhe  $n$ , von etwa 5 mm in  
20 Abstand gegenüber.

Innerhalb des Frontringes 54 sowie des Halteringes 56 ist ein radial zweistufiger Träger- oder Verschlussring 60 axialer Breite  $k_1$  von 15 mm angebracht, den Fig. 8 deutlich  
25 werden lässt mit einer achsparallelen Außenwand 61 des Innendurchmessers  $z$  von 65 mm. Etwa mittig zwischen der Außenkante 62 dieser Außenwand 61 sowie einer radialen ringartigen Frontwand 65 des Verschlussringes 60 ist letzterer durch eine -- ebenfalls ringförmige -- radiale Mittelwand 63 gestuft; an diese ist ein achsparalleler Wandring 64 des Außendurchmessers  $z_1$  von 51 mm angeformt und an  
30 letzteren jene Frontwand 65. Der Durchmesser  $z_2$ , der zentrischen Öffnung 66 der Frontwand 65 misst 35 mm. Der Querschnitt des Halteringes 56 besteht also aus zwei Winkelabschnitten, deren äußerer die Außenwand 61 und die Mittelwand 63 enthält; an letztere schließt der Wandring 64 des  
35

inneren Winkelabschnitts an, der auch die Frontwand 65 umfasst und an der zentrischen Öffnung 66 endet.

Zwischen der Mittelwand 63 des nichtmagnetischen Träger-  
5 oder Verschlussringes 60 sowie dem erwähnten Frontring 54  
ist ein ringförmiger -- bevorzugt metallischer -- Falten-  
balg 68 zu erkennen, der an den Außenring 57 angeschlossen  
ist sowie innenseitig an die Mittelwand 63 des Trägerringes  
60. Letzterer ist in der Gehäusebuchse 26 festlegt. Inner-  
10 halb des Wandringes 64 bzw. des Trägerringes 60 sind drei  
jeweils ringförmige Magnetdichtungen 70 angeordnet, deren  
Aufbau insbesondere Fig. 10, 11 entnommen zu werden vermag.  
Ihre Breite  $q$  misst etwa 3 mm, der Innendurchmesser  $y$  des  
Ringdurchbruches 72 etwa 35 mm und der Außendurchmesser  $y_1$   
15 hier 50 mm. Mit 74 ist ein Permanentmagnet für ein Fer-  
rofluid bezeichnet, der gemäß Fig. 16 zwei Polschuhe N, S  
enthält, beispielsweise gemäß Fig. 11 bei 76 einen quer-  
schnittlich U-förmigen Ring -- aus zumindest zwei Teilen --  
als Eisenrückschluss mit sich zum Ringdurchbruch 72 öffnen-  
20 dem Spalt 78 der Breite  $q_1$  von etwa 0,1 mm.

Die drei Dichtelemente 70 bilden eine magnetofluidische  
Dichtung zur Hochdruckseite und sind drei in Achsrichtung  
magnetisierte Permanentmagnete mit zugeordneten ferromagne-  
25 tischen Polschuhen N, S, die jeweils ein konzentriertes  
magnetisches Feld erzeugen, das ein Ferrofluid als Dicht-  
mittel fixiert. Der Faltenbalg 68 liegt zur besseren Mon-  
tierbarkeit der Vorrichtung am Frontring 54 an und ist mit  
dem Haltering 56 durch einen O-Ring 20 gegen die Gehäuse-  
30 buchse 26 abgedichtet, der durch den -- mit Außengewinde  
versehene -- Frontring 54 an der Gehäusebuchse 26 fixiert  
wird.

Zwei weitere Magnetdichtungen 70 der beschriebenen Art sind an der heckwärtigen Seite der Sicherungsringe 46 angeordnet. Diese Magnetdichtungen 70 werden von zwei entsprechenden Magnetdichtungen 70, anderer Durchmesserdimensionierung umfängen unter Zwischenschaltung eines Distanzringes 79.

Jener Verschluss- oder Trägerring 60 enthält weiterhin eine in Fig. 12, 13 skizzierte Scheibe 80 aus Siliziumkarbid, die Teil eines mechanischen Dichtungssystems aus zwei gleichartigen SiC-Scheiben 80, 80, der Breite  $g_1$  von etwa 7 mm mit Zentraldurchbruch 82 des Durchmessers  $t$  von etwa 39 mm ist. Der Außendurchmesser  $t_1$  der Scheibe 80, 80, sei mit etwa 65 mm angenommen. In der in Fig. 1 bis 5, 13 rechten Scheibe 80, sind an der Front- oder Kontaktfläche 84 -- entsprechend einem von außen nach innen wirkenden axialen Spiralrillenlager -- hier sechzehn vom Scheibenrand 81 ausgehende, in Draufsicht teilkreisförmig gebogene Spiralrillen 86 einer Tiefe von 10  $\mu\text{m}$  bis 20  $\mu\text{m}$  eingätzt oder eingeschliffen. Diese Spiralrillen 86 enden in radialem Abstand zur zentrischen Öffnung 66 und sind durch entsprechend gebogene Dammrippen 88 getrennt. Die Pumprichtung und die Spiralrillen 86 sind in Fig. 12 an der Scheibe 80, von außen zur Mitte vorgegeben.

Die Spiralrillen oder -nuten 86 können sowohl in die stationäre als auch in die bewegte Scheibe 80, 80, eingearbeitet sein. Wichtig ist, dass die bearbeitete Frontfläche 84 der anderen Scheibe 80, 80, direkt gegenüberliegt, damit im Betrieb die Förderwirkung erzeugt wird.

Die Dichtelemente 70 und die Scheibe 80 im Trägerring 60 sind gegen letzteren abgedichtet, z.B. dicht eingeschrumpft. Die zweite Scheibe 80, ist gegenüber der ersten auf der Wellenhülse 12 angeordnet. Fig. 5 macht einen Ringspalt 13 zwischen Scheibe 80 und Wellenhülse 12 deutlich. Im gewählten Ausführungsbeispiel wird die SiC-Scheibe 80, durch den Außenring 16 als seitlichem Anschlag und einen O-

Ring 20, der gleichzeitig eine Abdichtung gegen die Wellenhülse 12 und eine Drehmitnahme darstellt, festgelegt. Die Drehmitnahme kann -- falls erforderlich -- etwa durch einen Mitnehmerstift zwischen Anschlag 16 und SiC-Scheibe 80, unterstützt werden. Die gegenüberliegenden Flächen der Scheiben 80, 80<sub>a</sub> sind im Mikrometerbereich plan bearbeitet und weisen eine entsprechend feine Oberflächenrautiefe auf. Der Balg 68 des Trägerringes 60 gewährleistet eine Beweglichkeit der Kontaktflächen der Scheiben 80, 80<sub>a</sub> axial zueinander mit einem Abstand von Null bis einige Zehntel Millimeter. Im Stillstand werden die Scheiben 80, 80<sub>a</sub> durch die abzudichtende Druckdifferenz gegeneinandergedrückt, und somit wird durch die Scheiben 80, 80<sub>a</sub> die Hochdruckseite der Vorrichtung zur Niederdruckseite abgedichtet. Dichtelemente 70 und Dichtscheibe 80 an der Trägerscheibe 60 werden -- wie erwähnt -- zur Wellenhülse 12 durch den Ringspalt 13 in einem definierten konzentrischen Abstand von etwa 0,1 mm gehalten (Fig. 5).

Fig. 14. soll den Druckaufbau durch die Förderwirkung zwischen den beiden Scheiben 80, 80<sub>a</sub> verdeutlichen. Der obere Ausschnitt zeigt den Druckaufbau, wenn die linke Scheibe 80 nur durch eine Kraft belastet ist und das Druckniveau auf der Scheiben-Außen- und -Innenseite gleich ist (Funktion als Spiralrillen-Axiallager). Die beiden Ausschnitte darunter zeigen mögliche Druckverläufe, wenn die Kraft durch einen Mediendruck auf die linke Scheibe 80 und entsprechend höherem Druckniveau auf der Scheibeninnenseite -- wie erfindungsgemäß der Fall -- erzeugt wird. Abhängig vom Druckverlauf kann eine zusätzliche Maßnahme zur Druckregulierung entsprechend Fig. 5 notwendig werden, die weiter unten erläutert wird.

Die magnetofluidische Dichtung zur Atmosphärenseite besteht aus den vier oben beschriebenen Dichtelementen 70, 70<sub>a</sub>, die -- wie gesagt -- an den Sicherungsringen 46 so angeordnet sind, dass zwei Elemente 70 zur Wellenhülse 12 und zwei

Elemente 70, zur Gehäusebuchse 26 gerichtet sind. Das Magnetofluid hat in diesem Fall nicht nur eine dichtende, sondern auch eine zentrierende Wirkung, so dass die Scheibe 80 mit den Dichtungselementen axial frei beweglich ist  
5 zwischen -- in diesem Bereich zueinander konzentrisch zylindrisch liegender -- Wellenhülse 12 und Gehäusebuchse 26. Dadurch ist das Volumen im Bereich zwischen den magnetofluiden Dichtungen -- wie gefordert -- auf der Niederdruckseite variabel und somit eine gegen Null gehende  
10 Druckdifferenz zwischen der Niederdruckseite des Hilfsfluids sowie der Umgebung gewährleistet.

Fig. 15 lässt erkennen, wie der Raum zwischen den magnetofluidischen Dichtelementen 70 vorteilhafterweise mit  
15 Hilfe von zwei Anschlüssen 33 -- oder der beiden Gewindebohrungen 35 -- mit einer Hilfsflüssigkeit befüllt wird. Während ein Anschluss 33 zum Auffüllen mit der Hilfsflüssigkeit genutzt wird, dient der andere dazu, die Vorrichtung vorher mit einem Vakuum zu beaufschlagen, so dass die  
20 Hilfsflüssigkeit sämtliche Hohlräume innerhalb der Vorrichtung Q auffüllt. Durch geeignete Anordnung der Anschlüsse 33 an den gegenüberliegenden Seiten des Ringraumes 27 in der Gehäusebuchse 26, der die der Wellenhülse 12 zugeordnete Dichtscheibe 80, umschließt, lässt sich ein Differenzdruck zwischen den Anschlüssen 33 erzeugen, der zur Durchströmung der Vorrichtung mit Hilfsflüssigkeit aus einem  
25 externen Behälter während des Betriebes -- z.B. zur Kühlung -- genutzt werden kann. Dies wird etwa dadurch erreicht, dass der Ringraum 27 zwei unterschiedliche Seiten aufweist  
30 und eine der Seiten des Ringraumes 27 zur Scheibe 80 hin einen sehr geringen radialen Abstand von hier 0,1 mm und die andere Seite einen größeren Abstand von etwa 1 mm bildet.

35 Im Betrieb entfalten die SiC-Dichtscheiben 80, 80, mit den Spiralrillen 86 gegeneinander eine Förderwirkung auf die Hilfsflüssigkeit, die zwischen Niederdruckseite und Hoch-

druckseite der Vorrichtung Q einen der Förderwirkung entsprechenden Differenzdruck aufbaut. Die Hilfsflüssigkeit wird so gewählt, dass einerseits eine gute Schmierung des Wälzlagers 52 gewährleistet ist und ein möglichst hoher Differenzdruck über den Dichtscheiben 80, 80<sub>a</sub> entstehen kann (vorteilhaft: hohe Viskosität) und andererseits die Erwärmung der Hilfsflüssigkeit in beherrschbaren Grenzen bleibt (max. etwa 80°C, vorteilhaft: geringe Viskosität). Die Hilfsflüssigkeit wird darüber hinaus so gewählt, dass es mit dem Magnetofluid der Dichtungen 70, 70<sub>a</sub> verträglich ist - günstigenfalls kann auf das Trägeröl des Magnetofluids (z.B. ein Silikonöl) zurückgegriffen werden.

Um ein "Durchschlagen" der magnetofluiden Dichtung auf der Hockdruckseite durch Überdruck -- drei Ringe ertragen einen Differenzdruck von max. etwa 0,5 bar -- zu verhindern, muss die Förderwirkung der Dichtscheiben 80, 80<sub>a</sub> durch den an der hochdruckseitigen Dichtung anliegenden Differenzdruck limitiert werden. Dies wird durch die vorher bereits erwähnte Beweglichkeit der der Gehäusebuchse 26 zugeordneten Dichtscheibe 80 durch den Faltenbalg 68 erzielt. Erzeugen die Dichtscheiben 80, 80<sub>a</sub> im Betrieb einen höheren Druck als den abzudichtenden innerhalb der Pumpe, wird die Trägerscheibe 60 mit der zugeordneten Dichtscheibe 80 in Richtung des abzudichtenden Druckes bewegt: der Abstand zwischen den Dichtscheiben 80, 80<sub>a</sub> wird größer und konsequenterweise lässt die Förderwirkung nach. Umgekehrt führt ein zu geringer -- durch die Dichtscheiben 80, 80<sub>a</sub> -- erzeugter Druck zur Verringerung des Spaltes zwischen den Dichtscheiben 80, 80<sub>a</sub> und damit zur Erhöhung der Förderwirkung.

In Fällen, in denen die oben dargestellte Selbstregulierungswirkung zwischen den Dichtscheiben 80, 80<sub>a</sub> nicht ausreicht, ist die Unterstützung der Regelung mit Hilfe einer Überströmfunktion zwischen Hochdruck und Niederdruckbereich der Hilfsflüssigkeit realisierbar. Dabei wird die Dichtscheibe

80 auf der Hochdruckseite innerhalb des Trägerringes 60 axial verschiebbar und mit radialer Luft -- Radialspalt 17 zwischen Trägerring 60 und Dichtscheibe 80 von 0, 1 mm in Fig. 5 -- nach außen angeordnet. Zur radialen Fixierung und zur Drehmitnahme am Trägerring 60 dienen gemäß Fig. 5 mindestens zwei Mitnehmerstifte 67. Am äußeren Ende der Dichtscheibe 80 begrenzt eine radiale Anlagefläche 69 einen Dichtspalt. Die Anordnung der Anlagefläche 69 ist so gewählt, dass die Dichtscheibe 80 vom Trägerring 60 abhebt und somit der Dichtspalt öffnet, wenn der Druck zwischen Dichtscheibe 80 und Trägerring 60 höher ist als der Druck des abzudichtenden Fluids auf der Hochdruckseite. Von der Anlagefläche 69 geht ein achsparallel verlaufender Ringspalt 21 aus, der einerseits von der Außenwand 61 des Trägerringes 60 begrenzt ist sowie andererseits vom Umfang der -- der Gehäusebuchse 26 zugeordneten -- Dichtscheibe 80.

Insbesondere bei Anwendungen, bei denen keine chemisch aggressiven Medien abzudichten sind, bestehen verschiedene Möglichkeiten zur Kostenreduktion der Konstruktion. So können die Funktionen der Wellenhülse 12 und der Gehäusebuchse 26 von Welle 10 und Gehäuse übernommen werden. Die magnetofluidischen Dichtungen lassen sich kostengünstiger realisieren, wenn die Welle 10 aus ferromagnetischem Material gestaltet wird, so dass die magnetischen Feldlinien durch die Welle 10 geführt werden. Dadurch sind Anordnungen möglich, bei denen das magnetische Feld eines einzigen Permanentmagneten über mehrere Dichtspalte geführt wird. Die auf der Niederdruckseite notwendige Zentrierwirkung ist dann aber nicht mehr gegeben. Es liegt im Gegenteil eine Instabilität vor, so dass die Anpassung des Volumens des Raumes für die Hilfsflüssigkeit auf andere Weise als beschrieben realisiert werden muss. Die genannten Dichtscheiben 80, 80<sub>a</sub> aus SiC können für einfache Anwendungen aus kostengünstigeren Materialien hergestellt und in andere Bauteile integriert werden.

Beim dargestellten Prinzip zur Erzeugung einer Druckdifferenz mit Hilfe von Dichtscheiben 80, 80, mit Spiralnuten 86 handelt es sich lediglich um eine Ausführungsmöglichkeit.  
5 Andere Prinzipien -- wie z.B. Fördergewinde -- sind denkbar und möglich.

Der prinzipielle Aufbau einer magnetofluidischen Dichtung ist Fig. 16 zu entnehmen. Das Magnetfeld eines ringförmigen Permanentmagneten 74 mit axialer Magnetisierung wird durch  
10 zwei Polschuhe 73 auf einen Ringspalt 77 um die Welle 10 konzentriert. Das konzentrierte Feld hält ein Magnetofluid 75 stationär in jenem Ringspalt 77 fest, das somit eine Dichtwirkung zwischen den beiden Seiten des Aufbaus hervor-  
15 ruft.

Um ein Durchmischen zwischen abdichtender Flüssigkeit und Magnetofluid der Dichtung 70 zu verhindern, wird die oben beschriebene Vorrichtung gemäß Fig. 17 wie folgt ergänzt.  
20

Am Trägerring 60 wird ein Bereich, ein Raum oder eine Kammer 90 der magnetofluidischen Dichtung 70 vorgelagert angeordnet, der/die teilweise mit einem Gas G -- beispielsweise Luft oder einem Inertgas -- gefüllt ist. Die Kammer 90 wird  
25 auf der der Vorrichtung abgewandten Seite zur Welle 10 mit einem Ring- oder Dichtspalt 92 der Weite  $q$ , von etwa 0,1 mm abgedichtet, dessen Durchmesser  $f_1$  größer ist als der Durchmesser des Dichtspaltes 78 der magnetofluidischen Dichtung 70 am Trägerring 60 aber kleiner als der Durchmes-  
30 ser  $f_2$  der äußeren Kammerwand 94.

Das Volumen der Kammer 90 und die Durchmesser der Dichtspalte sind so gestaltet, dass bei horizontaler Anordnung und Stillstand des Systems sowie bei Umgebungsdruck innerhalb der Kammer 90 immer ein bestimmtes Gasvolumen  $V_0$  im  
35 oberen Bereich der Kammer 90 -- oberhalb von deren Dichtspalt 92 -- residual vorhanden ist. Im Betrieb sammelt sich



dieses Gasvolumen im Bereich des kleinsten Durchmessers des Rotors -- dies ist im vorliegenden Fall der Dichtspalt 77 der magnetofluidischen Dichtung 70 -- konzentrisch um die Welle 10 und wird durch den Betriebsdruck auf ein Volumen  $V_1$  zusammengedrückt. Auch wenn  $V_1$  gleich  $V_0$  ist, soll durch geeignete Wahl des Durchmessers  $f_1$  des Dichtspaltes 92 der Kammer 90 dabei kein Gas aus diesem Dichtspalt 92 entweichen. Andererseits soll  $V_1$  groß genug sein, um den Dichtspalt 77 der magnetofluiden Dichtung 70 im Betrieb auch bei maximalen Druck komplett abzudecken. Ein günstiges Durchmesserverhältnis zwischen dem Dichtspalt 77 der magnetofluidischen Dichtung 70, dem Dichtspalt 92 der Kammer 90 und dem inneren Außendurchmesser der Kammer ist 1 zu 1,2 zu 1,5. Mit  $V_1^*$  ist in Fig. 17 das Gasvolumen bei Maximaldruck bezeichnet.

Die Anordnung stellt -- wie schon erwähnt -- sicher, dass die magnetofluidische Dichtung im Betrieb stets nur mit Gas in Kontakt kommt. Eine Durchmischung des Magnetofluids mit einer abzudichtenden Flüssigkeit wird somit wirksam verhindert.

Die Fig. 18 bis 20 zeigen in abstrahierter Darstellung ein Prinzip der Erfindung zu zwei -- in axialem Abstand  $s$  zueinander verlaufenden -- magnetofluidischen Dichtungen 70, die an einer Welle 10 und einer zu dieser parallelen Gehäusewand 24 als druckisolierendem Element so angeordnet sind, dass drei Bereiche oder Räume entstehen: ein Raum 90, mit einem abzudichtenden Fluid A bestimmten Druckes (z. B. Fördermedium mit 25 bar), ein Raum 96 mit einer Hilfsflüssigkeit H zwischen den Dichtungen 70 sowie ein Raum 98 mit einem Fluid B mit einem Differenzdruck zu Fluid A (z.B. Umgebungsluft mit 1 bar absolut). Der mittlere Raum 96 ist in zwei Hälften oder Abschnitte 96<sub>a</sub>, 96<sub>b</sub> geteilt durch eine Fördereinrichtung 100, die als Pumpensymbol in Form eines Kreises samt innenliegendem Dreieck skizziert ist für die Mittel, die eine Förderwirkung und damit einen Differenz-

druck erzeugen. Die Verbindung 71 des Kreises mit der Gehäuseseite und die Verbindung 71<sub>a</sub> des Dreiecks mit der Wellenseite symbolisiert die Zuordnung der Bauteile der Fördereinrichtung zu bewegten und stationären Teilen der Vorrichtung.

Die punktiert hervorgehobenen Räume 90<sub>a</sub>, 96<sub>a</sub> verdeutlichen Bereiche hohen Druckes; der Differenzdruck zwischen besagten Räumen wird mit geeigneten Mitteln -- symbolisiert durch die "Messleitung" 95 und dem Symbol " $\Delta p = 0$ " -- aufgenommen und ein Signal -- symbolisiert durch die Pfeillinie 95<sub>a</sub> -- zur Regulierung der Fördereinrichtung 100 in Abhängigkeit vom Differenzdruck erzeugt. In den punktfreien Räumen 96<sub>b</sub>, 98 herrscht niedriger Druck.

In Fig. 18 geschieht die Druckregulierung allein durch Regelung der Fördereinrichtung über den Differenzdruck (bevorzugte Lösung). Ergänzend sei dazu auf Fig. 4 Bezug genommen. Fig. 19 zeigt die Druckregelung mit Hilfe einer -- an jene Messleitung 95 mit einer Pfeillinie 95<sub>b</sub> angeschlossenen sowie durch ein Überströmventil symbolisierten -- Überströmeinrichtung 97, die vom Differenzdruck angesteuert wird und sich in einer der Räume 96<sub>b</sub> und 98 verbindenden Leitung 99 befindet. Fig. 20 verdeutlicht die Kombination beider Regelvarianten entsprechend Fig. 5 der konkreten Ausführung.

Im Bereich 96 mit der Hilfsflüssigkeit H befinden sich also Mittel, die innerhalb dieses Bereiches 96 einen Differenzdruck erzeugen, wobei der höhere Druck auf der Seite zum Fluid A mit dem höheren Druck hin und umgekehrt erzeugt wird. Die erzeugbare Druckdifferenz muss mindestens dem maximal auftretenden Differenzdruck von Fluid A und Fluid B entsprechen. Zudem sind Mittel vorhanden, die auf den Differenzdruck zwischen dem Fluid A mit höherem Druck und dem Maximaldruck der Hilfsflüssigkeit H reagieren. Die Reaktion wird dazu genutzt, um durch geeignete Mittel die genannte

Druckdifferenz auf einen Wert nahe Null zu regeln. Dies kann z.B. durch Regelung der Leistung der Druckdifferenz erzeugenden Mittel geschehen oder durch Regelung einer Rückströmung aus dem Raum 90, hohen Druckes der Hilfsflüssigkeit H zum Raum 96, niedrigen Druckes.

- Indem das Volumen des der Hilfsflüssigkeit H zugeordneten Raumes 96 variabel gestaltet wird, kann sichergestellt werden, dass auch die Druckdifferenz zwischen dem Minimaldruck der Hilfsflüssigkeit H und dem Druck des Fluids B mit dem niedrigeren Druck nahezu Null ist. Dies kann zum Beispiel durch eine flexible Membrane zwischen einer Seite des Raumes für die Hilfsflüssigkeit H und dem Fluid mit entsprechendem Druck realisiert werden oder durch bewegliche Anordnung einer der magnetofluidischen Dichtungen 70. Bei Anordnung mit Umgebungsluft unter Normaldruck (1 bar) auf der Niederdruckseite ist es am vorteilhaftesten, den Raum 96 auf dieser Seite im Volumen variabel zu gestalten.
- Die dargestellten Mittel stellen sicher, dass die magnetofluidischen Dichtungen 70 auch bei hohen Druckdifferenzen der Fluide A, B nur mit geringen Differenzdrücken belastet werden - und somit ihre hermetische Dichtungsfunktion sichergestellt ist. Die Kraftübertragung erfolgt mechanisch über das kraftübertragende Element, z.B. die Welle 10, so dass hohe Übertragungsleistungen möglich sind.

Die Druckdifferenz innerhalb der Hilfsflüssigkeit H wird beispielsweise durch Relativbewegung von geometrischen Elementen erzeugt, die der Welle 10 und dem Gehäuse statisch zugeordnet sind und eine Fördereinrichtung für die Hilfsflüssigkeit H bilden. Dabei wird durch geeignete Maßnahmen -- z.B. durch jenes Rückschlagventil -- sichergestellt, dass bei Stillstand des Systems kein Druckausgleich zwischen Hoch- und Niederdruckbereich 96, bzw. 96, der Hilfsflüssigkeit H stattfindet.

## PATENTANSPRÜCHE

1. Vorrichtung zum Führen zumindest zweier Strömungsmittel  
5 unterschiedlichen Druckes mit einer Welle od.dgl.  
kraftübertragendem Organ sowie einem druckisolierenden  
Element wie einem die Welle od.dgl. umgebenden Gehäuse,  
  
dadurch gekennzeichnet,  
10  
dass zwischen dem kraftübertragenden Organ (10) und dem  
druckisolierenden Element durch Dichtungselemente (70,  
70<sub>a</sub>) in Achsrichtung nebeneinander liegende Räume (90,  
90<sub>a</sub>; 96; 98) bestimmt sind, wobei zumindest eines der  
15 Dichtungselemente (70, 70<sub>a</sub>) leakagefrei ausgebildet ist  
sowie zwei Räume (90, 90<sub>a</sub>; 98) für Fluide (A, B) unter-  
schiedlichen Druckes einen Raum (96) für eine Hilfs-  
flüssigkeit (H) flankieren und letzterer durch eine  
20 Einrichtung (100) in zwei Teilräume (96<sub>a</sub>, 96<sub>b</sub>) für zwei  
unterschiedliche Druckbereiche unterteilt ist.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch ein  
magnetofluidisches Dichtungselement (70, 70<sub>a</sub>) zum Be-  
grenzen des Raumes (96) für die Hilfsflüssigkeit (H).
- 25 3. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch  
gekennzeichnet dass dem Raum (90<sub>a</sub>) höheren Drucks ein  
Fördermedium sowie dem Raum (98) niederen Drucks Umge-  
bungsluft zugeordnet ist.
- 30 4. Vorrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet,  
dass die Hilfsflüssigkeit (H) ein Trägeröl des dem  
Dichtungselement (70, 70<sub>a</sub>) zugeordneten Magnetofluids  
ist, gegebenenfalls ein Silikonöl.

5. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 3, dadurch gekennzeichnet, dass der Raum (96) für die Hilfsflüssigkeit (H) zwei Anschlüsse (33) aufweist, von denen einer zum Erzeugen eines Vakuums sowie der andere als Durchgang für die Hilfsflüssigkeit (H) ausgebildet ist.
6. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 3, dadurch gekennzeichnet, dass der Teilraum (96<sub>a</sub>) für den höheren Druck der Hilfsflüssigkeit (H) dem Raum (90<sub>a</sub>) für das Fluid (A) höheren Druckes zugeordnet ist (Fig. 18 bis 20).
7. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 6, gekennzeichnet durch Mittel zum Erzeugen einer Druckdifferenz zwischen den Teilräumen (96<sub>a</sub>, 96<sub>b</sub>), wobei die Mittel bevorzugt innerhalb der Teilräume (96<sub>a</sub>, 96<sub>b</sub>) angeordnet sind.
8. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 7, gekennzeichnet durch relativ zueinander bewegbare, dem druckisolierenden Element und dem kraftübertragenden Organ (10) zugeordnete geometrische Teile, die zum Erzeugen einer Druckdifferenz eine Fördereinrichtung für die Hilfsflüssigkeit (H) bilden.
9. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass die den Raum (96) für die Hilfsflüssigkeit (H) teilende Einrichtung eine Fördereinrichtung (100) ist.
10. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass die erzeugbare Druckdifferenz zumindest dem maximal auftretenden Differenzdruck zwischen den Fluiden (A, B) entspricht.

11. Vorrichtung nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet,  
dass Mittel vorgesehen sind, mit welchen die Druckdif-  
ferenz zwischen dem maximalen Druck der Hilfsflüssig-  
keit und dem Druck des Fluids mit dem höheren Druck  
5 gegen Null regelbar ist, bevorzugt Organe zum Regeln  
der Leistung der die Druckdifferenz erzeugenden Mittel.
12. Vorrichtung nach Anspruch 11, gekennzeichnet durch Or-  
gane (97, 99) zum Regeln einer Rückströmung aus dem  
10 Teilraum (96<sub>a</sub>) höheren Drucks der Hilfsflüssigkeit (H)  
zum Teilraum (96<sub>b</sub>) niederen Drucks, wobei gegebenen-  
falls zwischen den Teilräumen (96<sub>a</sub>, 96<sub>b</sub>) für die Hilfs-  
flüssigkeit (H) eine Leitung (99) mit ventilartiger  
Überströmeinrichtung (97) vorgesehen ist.
13. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 12, dadurch  
gekennzeichnet, dass das Volumen zumindest des Raumes  
15 (96) für die Hilfsflüssigkeit (H) veränderbar ausgebil-  
det ist.
14. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 6 bis 13, dadurch  
gekennzeichnet, dass zumindest der Teilraum (96<sub>b</sub>) für  
20 den niedrigen Druckbereich der Hilfsflüssigkeit (H) in  
seinem Volumen veränderbar gestaltet ist.
15. Vorrichtung nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch mem-  
branartige Dichtungselemente zum Begrenzen des Raumes  
(96) für die Hilfsflüssigkeit (H).
16. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 2 bis 15, dadurch  
gekennzeichnet, dass sich beidseits des Raumes (96) für  
30 die Hilfsflüssigkeit (H) zwischen dem kraftübertragen-  
den Organ (12) und dem druckisolierenden Element (24)  
ein magnetofluidisches Dichtelement (70, 70<sub>a</sub>) er-  
streckt.  
35

17. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 16, dadurch gekennzeichnet, dass das Dichtungselement (70, 70<sub>a</sub>) wenigstens einen Permanentmagneten (74) in einem Ring (76) enthält sowie ein dem kraftübertragenden Organ bzw. der Welle (10) an einem Ringspalt (77) zugeordnetes Magnetofluid (75).
18. Vorrichtung nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, dass der Permanentmagnet (74) Teil einer das Dichtungselement bildenden Magnetdichtung (70) ist, welche mit dem Ring (76) die Welle (10) umfängt, wobei gegebenenfalls das Magnetfeld des ringförmigen Permanentmagneten (70) mittels zugeordneter Polschuhe (73) auf den Ringspalt (77) konzentriert ist.
19. Vorrichtung nach Anspruch 17 oder 18, gekennzeichnet durch in Achsrichtung magnetisierte Permanentmagnete (70) an der Hochdruckseite in einem Träger- oder Verschlussring (60) aus nicht magnetischem Werkstoff oder durch zumindest zwei konzentrische Magnetdichtungen (70, 70<sub>a</sub>), deren Querschnitte durch wenigstens einen achsparallelen Distanzring (79) getrennt sind.
20. Vorrichtung nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, dass dem Verschlussring (60) ein Faltenbalg (68) anliegt, der andererseits dem Druck tragenden Element anliegt.
21. Vorrichtung nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, dass der Faltenbalg (68) aus metallischem Werkstoff besteht sowie an seiner radialen Außenseite bevorzugt von einem Haltering (56) umgeben ist, und/oder sich gegen einen an die Gehäusebuchse (26) festliegenden Frontring (54) abstützt.

22. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 19 bis 21, dadurch gekennzeichnet, dass der Verschlussring (60) zumindest eine Dichtscheibe (80) als Teil eines wenigstens zwei Dichtscheiben (80, 80<sub>a</sub>) mit Zentraldurchbruch (82) umfassenden mechanischen Dichtungssystems enthält, wobei die Dichtscheibe (80, 80<sub>a</sub>) gegebenenfalls aus Siliziumkarbid geformt ist.
23. Vorrichtung nach Anspruch 22, dadurch gekennzeichnet, dass die Dichtscheiben (80, 80<sub>a</sub>) mit Kontaktflächen (84) aufeinander liegen, wobei gegebenenfalls zumindest eine Dichtscheibe (80<sub>a</sub>) in der Kontaktfläche (84) vom Scheibenrand (81) zum Scheibenzentrum gekrümmt verlaufende spiralartige Rillen bzw. Vertiefungen (86) geringer Tiefe (c) aufweist, die in Abstand zum Zentraldurchbruch (82) enden und von der Kontaktfläche der anderen Dichtscheibe (80) übergriffen sind.
24. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 23, dadurch gekennzeichnet, dass wenigstens eine die Welle (10) umgebende Wellenhülse (12) und eine dazu koaxiale Gehäusebuchse (26) jeweils aus einem nicht magnetischen Werkstoff bestehen sowie zwischen diesen zumindest zwei der die Welle umfassenden magnetofluidischen Dichtungselemente (70, 70<sub>a</sub>) vorgesehen sind.
25. Vorrichtung nach Anspruch 24, dadurch gekennzeichnet, dass die Wellenhülse (12) gegen die Welle (12) und die Gehäusebuchse (26) gegen das Gehäuse durch O-Ringe (20) statisch abgedichtet ist.
26. Vorrichtung nach Anspruch 24 oder 25, dadurch gekennzeichnet, dass das Kraft übertragende Organ bzw. die Wellenhülse (12) und das Druck isolierende Elemente bzw. die Gehäusebuchse (26) durch radial zur Längsachse bzw. der Wellenhülse angeordnete Wälzlager (52) konzen-



trisch drehbar in definiertem axialem Abstand gehalten sind, insbesondere durch ein Doppelschräggugellager.

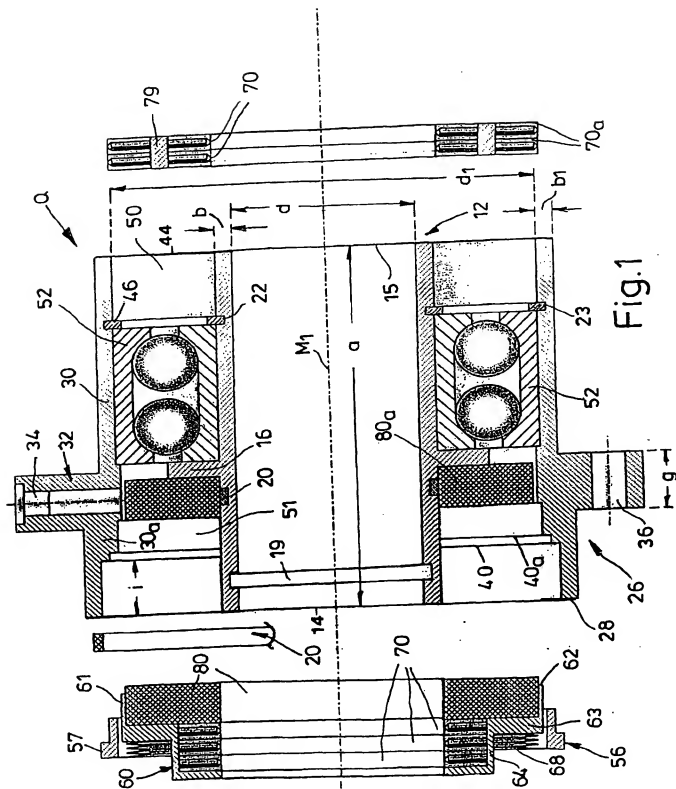
27. Vorrichtung nach Anspruch 22 und 26, dadurch gekennzeichnet, dass das Wälzlager (52) einem Außenring (16) der Wellenhülse (12) anliegt, dem andererseits eine der Dichtscheiben (80a) aus Siliziumkarbid zugeordnet ist.
28. Vorrichtung nach Anspruch 22 oder 27, dadurch gekennzeichnet, dass eine Dichtscheibe (80<sub>a</sub>) in einem sich von dem Außenring (16) weg axial stufenweise erweitern- den Abschnitt (51) des Ringraums (50) lagert, dem der Verschlussring (60) mit der anderen Dichtscheibe (80) zugeordnet ist.
29. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 2 bis 23, gekennzeichnet durch eine Welle (10) aus ferromagnetischem Werkstoff.
30. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 22 bis 23, dadurch gekennzeichnet, dass zwischen der Außenfläche der Dichtscheibe (80) und dem benachbarten Verschlussring (60) ein Radialspalt (17) verläuft.
31. Vorrichtung nach Anspruch 30, dadurch gekennzeichnet, dass an den Radialspalt (17) einerseits ein axialer Ringspalt (77) zwischen der Welle (10) und den Dicht- elementen (70) anschließt sowie andererseits ein axialer Ringspalt (13), der die benachbarte Dichtscheibe (80) untergreift und/oder, dass am radial äußeren Ende des Radialspaltes (17) eine Anschlagfläche (69) vorgesehen ist, an welche ein äußerer Ringspalt (21) angrenzt, der achsparallel verläuft (Fig. 5).
32. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 28 bis 31, dadurch gekennzeichnet, dass die Dichtscheibe (80) durch wenig- stens einen achsparallelen Mitnehmerstift (67) an die

Mittelwand (63) des Verschlussrings (60) angeschlossen ist.

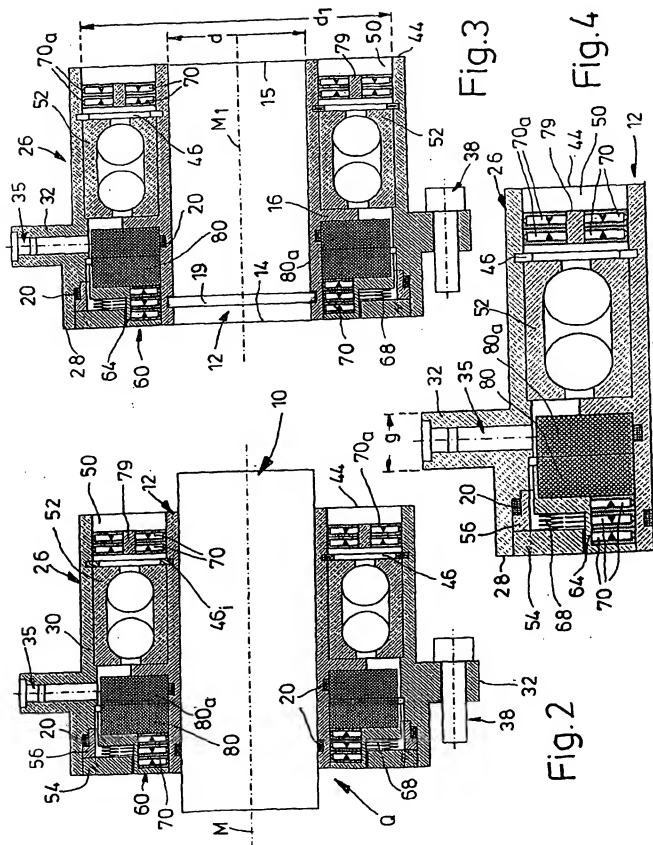
33. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 32, dadurch gekennzeichnet, dass der mit einem Fluid beaufschlagten Seite eine teilweise mit einem Gas (G) gefüllte sowie mit einem Dichtspalt (92) versehene Kammer (90) vorge-  
lagert ist.
34. Vorrichtung nach Anspruch 33, dadurch gekennzeichnet, dass die teilweise mit einem Gas (G) gefüllte sowie mit einem Dichtspalt (92) versehene Kammer (90) dem magnetofluidischen Dichtungselement (70) am Träger- oder Verschlussring (60) vorgelagert ist (Fig. 17).
35. Vorrichtung nach Anspruch 33 oder 34, dadurch gekennzeichnet, dass die Breite ( $q_1$ ) des Dichtspaltes (92) größer ist als die Breite ( $q_2$ ) des Dichtelements (70) des Dichtspaltes (77) am Träger- oder Verschlussring (60) zur Welle (10) hin, wobei gegebenenfalls das Verhältnis zwischen der Breite ( $q_2$ ) des Dichtspaltes (77), der Breite ( $q_1$ ) des Dichtspaltes (77) der Kammer (90) sowie dem inneren Außendurchmesser ( $f_1$ ) der Kammer (90) bzw. der äußeren Kammerwand (94) von 1 zu 1,2 zu 1,5 beträgt.
36. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 33 bis 35, dadurch gekennzeichnet, dass der Querschnitt der Kammer (90) nach außen hin erweitert ist (Fig. 17).
37. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 33 bis 36, dadurch gekennzeichnet, dass der Kammer (90) ein Hilfsanschluss für Inertgas zugeordnet ist.
38. Verfahren zum Führen zumindest zweier Strömungsmittel unterschiedlichen Druckes mit einer Welle od. dgl. kraftübertragendem Organ sowie einem druckisolierenden

- Element wie einem die Welle od.dgl. umgebenden Gehäuse, insbesondere unter Verwendung einer Vorrichtung nach wenigstens einem der voranstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass zwischen dem kraftübertragenden Organ (10) und dem druckisolierenden Element in durch jeweils ein Dichtungselement (70, 70<sub>a</sub>) begrenzten Räumen (90, 90<sub>a</sub>; 98) Fluide (A, B) unterschiedlichen Druckes und zwischen diesen in einem Raum (96) eine Hilfsflüssigkeit (H) gehalten werden, wobei in letzterer zwei Druckbereiche hergestellt werden sowie der Teilbereich für den höheren Druck der Hilfsflüssigkeit (H) dem Raum (90<sub>a</sub>) für das Fluid (A) höheren Druckes zugeordnet wird.
39. Verfahren nach Anspruch 38, dadurch gekennzeichnet, dass der Raum (96) für die Hilfsflüssigkeit (H) beidseits zu den Räumen (90, 90<sub>a</sub>; 98) für die Fluide (A, B) durch magnetofluidische Dichtungselemente (70, 70<sub>a</sub>) hermetisch abgedichtet wird.
40. Verfahren nach Anspruch 38 oder 39, dadurch gekennzeichnet, dass der Raum (96) für die Hilfsflüssigkeit (H) vor dieser mit einem Vakuum beaufschlagt wird.
41. Verfahren nach einem der Ansprüche 38 bis 40, dadurch gekennzeichnet, dass dem Raum (90, 90<sub>a</sub>) höheren Drucks ein Fördermedium sowie dem Raum (98) niederen Drucks Umgebungsluft zugeführt wird.
42. Verfahren nach einem der Ansprüche 38 bis 41, dadurch gekennzeichnet, dass die erzeugbare Druckdifferenz zumindest dem maximal auftretenden Differenzdruck zwischen den Fluiden (A, B) entspricht oder, dass die Leistung der die Druckdifferenz erzeugenden Mittel geregelt wird.

43. Verfahren nach einem der Ansprüche 38 bis 42, dadurch gekennzeichnet, dass eine Rückströmung aus dem Teilraum (96<sub>a</sub>) höheren Drucks der Hilfsflüssigkeit (H) zum Teilraum (96<sub>a</sub>) niederen Drucks geregelt wird.
- 5
44. Verfahren nach einem der Ansprüche 38 bis 43, dadurch gekennzeichnet, dass die Druckdifferenz innerhalb der Hilfsflüssigkeit (H) durch Relativbewegung geometrischer Elemente erzeugt wird, die der Welle (10) einerseits und dem druckisolierenden Element andererseits zugeordnet sind und eine Fördereinrichtung (100) bilden.
- 10
45. Verfahren nach einem der Ansprüche 38 bis 44, dadurch gekennzeichnet, dass durch Dichtscheiben (80, 80<sub>a</sub>), die zwischen sich spiralartige Rillen bzw. Vertiefungen (86) begrenzen, eine Förderwirkung für die Hilfsflüssigkeit (H) aufgebaut wird, wobei gegebenenfalls die Förderwirkung der Dichtscheiben (80, 80<sub>a</sub>) durch Erhöhung von deren Druck sowie des Abstandes zueinander erhöht wird.
- 15
- 20
46. Verfahren nach einem der Ansprüche 38 bis 45, dadurch gekennzeichnet, dass in einer dem Dichtungselement (70) vorgelagerten sowie ein Gas enthaltenden Kammer (90) das Gasvolumen im Betrieb im Bereich des Dichtspaltes (77) zwischen Dichtungselement und Welle (10) konzentrisch um diese gesammelt sowie durch den Betriebsdruck zusammengedrückt wird.
- 25



217



3/7

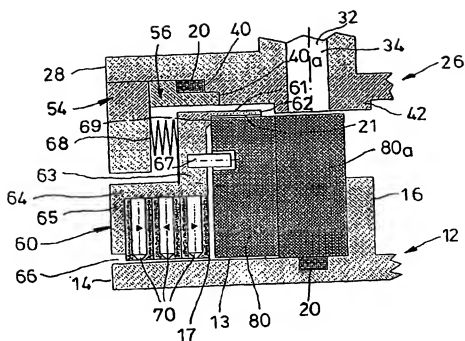


Fig.5

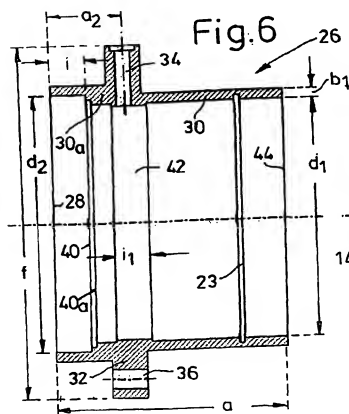


Fig.6

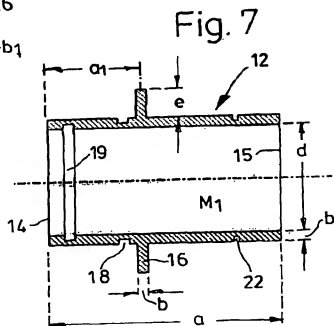


Fig.7

4/7

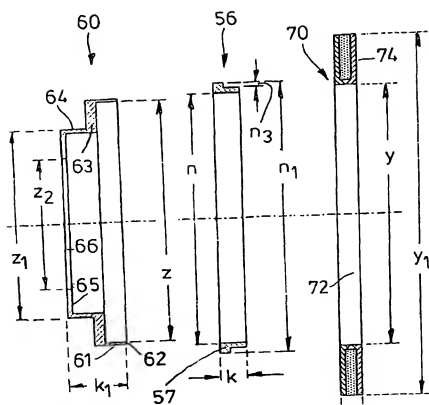


Fig. 8

Fig. 9

Fig. 10

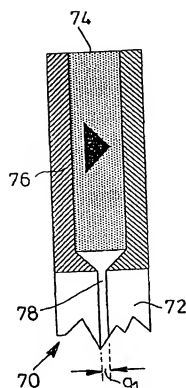


Fig. 11

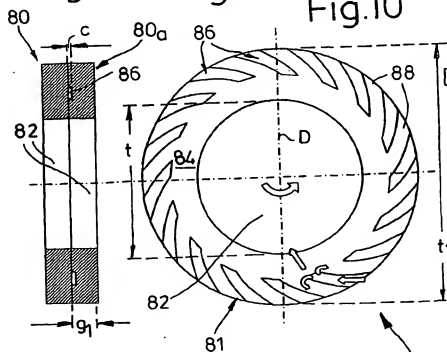


Fig. 13

Fig. 12

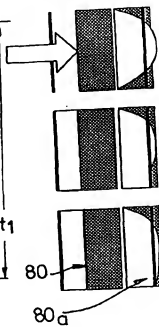


Fig. 14



5/7

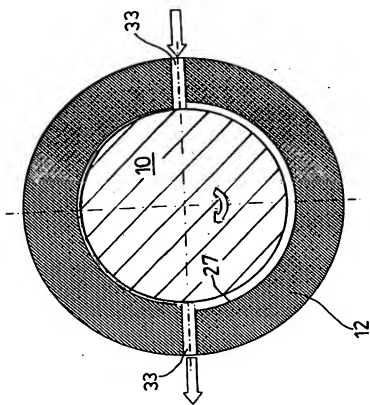
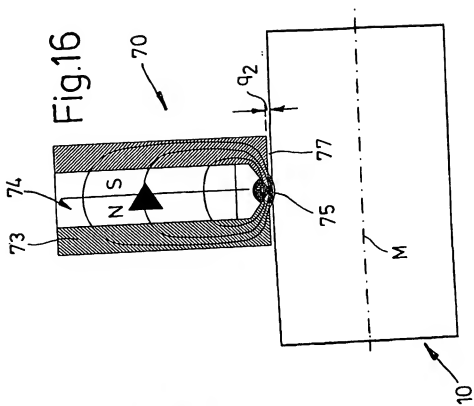


Fig.15

6/7

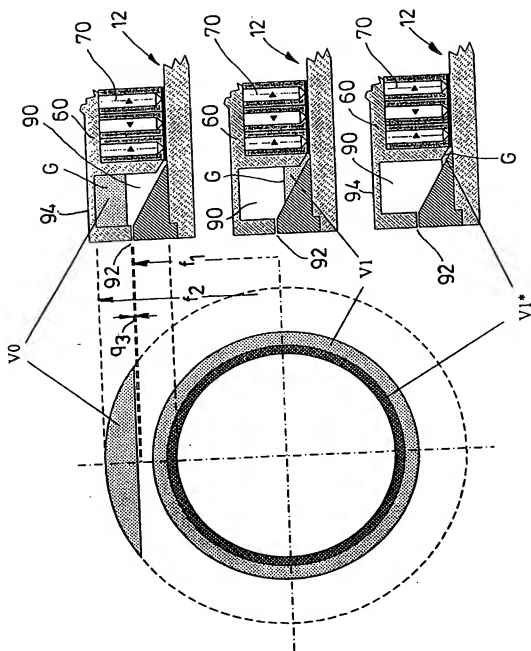


Fig.17

Fig.19

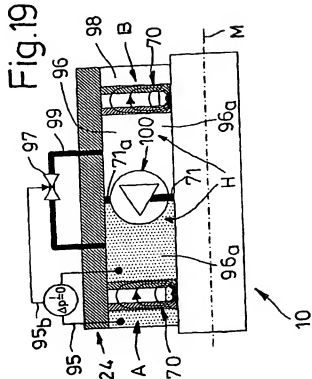


Fig.18

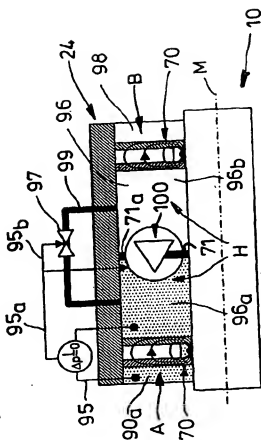
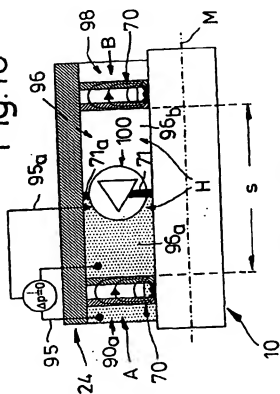


Fig.20